doi:10.13866/j.azr.2018.04.01

塔克拉玛干沙漠北缘夏秋冬季地表能量平衡闭合特征①

曹寰琦[1,2,3]，何　清[2,3]，金莉莉[2,3]，李振杰[4]，杨兴华[2,3]，霍　文[2,3]

（1. 新疆大学资源与环境科学学院,新疆 乌鲁木齐　830046；2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐　830002；3. 新疆塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站,新疆 塔中　841000；4. 云南省临沧市气象局,云南 临沧　677099）

摘　要: 利用塔克拉玛干沙漠北缘肖塘陆—气相互作用观测站 2014 年 7 月—12 月的陆面通量数据,通过最小二乘法(OLS)和能量平衡比率法(EBR)研究该地区能量平衡闭合特征。结果表明:能量通量各分量均呈倒“U”形单峰变化趋势,除潜热通量外,均有明显的季节变化特征,表现为:夏季 > 秋季 > 冬季。能量平衡闭合程度:全天 > 白天 > 夜间,且具有逐月递减的变化趋势。地表以下 5 cm 处土壤热通量下的能量闭合程度明显高于地表土壤热通量下的能量闭合程度。能量闭合率在日出日落时段波动剧烈,夜间为负,且下午明显高于上午。不同天气下的能量闭合程度表现为:晴天 > 阴天 > 沙尘暴 > 降雨。

关键词: 涡动相关法; 能量平衡闭合; 能量平衡比率; OLS 线性回归; 塔克拉玛干沙漠

近地层湍流通量(感热通量和潜热通量)和有效能量(净辐射和土壤热通量)的观测和研究,在大气边界层气象学中占有极其重要的地位[1]。被广泛关注的能量闭合问题是陆面过程研究中的一个难题和热点问题,能量不闭合现象在地表通量观测中常常遇到,几乎所有的陆面过程模式都基于能量和物质平衡原理,据此近地层观测的能量不闭合现象必将对陆面过程模式的发展及检验产生重要影响[2]。

随着涡动相关技术的广泛应用,人们对于不同下垫面的能量闭合问题已经有了一定的认识。在前人的研究中,平坦荒漠地区能量几乎闭合,低矮植被下垫面能量不闭合约 30%,而人工植被下垫面能量不闭合度总体上比低矮植被下垫面小,约为 20%[3-5]。Wilson 指出全球大部分通量站能量不闭合,平均不闭合率为 20%,而能量不闭合普遍出现在有植被的下垫面[6]。Stoy 等研究表明,地形景观水平异质性作为能量不闭合的一个重要贡献项不能被忽略[7]。李正泉等研究表明,能量闭合程度随摩擦风速的增大而有所改善[8]。岳平等研究指出,半干旱草原下垫面土壤热储量对能量闭合有明显影响[9]。杨启东等发现,近地层能量不闭合的残差有可能存在于大气中[2]。张强等的研究在一定程度上证明了在半干旱地区垂直感热平流对地表能量收支具有重要贡献[10]。Yue 等计算并分析了黄土高原地表能量闭合率发现,其闭合率白天高于夜间[11]。张佩等研究了塔里木河下游荒漠河岸林涡动相关通量测定中平均时间对通量计算的影响,发现平均时间延长能进一步增大通量绝对值[12]。但是对于植被覆盖率较小的沙漠及沙漠—绿洲过渡带的陆面过程研究却相对缺乏,与其他干旱半干旱区下垫面相比,塔克拉玛干沙漠具有极端干旱、地表反照率高、流动沙面下垫面以及频繁沙尘天气等特点,对人类活动及气候变化极为敏感,故生态环境不稳定的沙面下垫面对气候有着更大的影响[13]。因此,研究我国沙漠地区的能量闭合状况具有极其重要的意义。

本次研究开展于塔克拉玛干沙漠北缘肖塘陆—气相互作用观测试验站,利用观测所得到的陆面通量数据,并结合当地天气现象观测资料,分析能量通

① **收稿日期:** 2017-09-15;　**修订日期:** 2018-01-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(41605008),中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(IDM201505);公益性行业(气象)科研专项[GYHY(QX)201506001-14]
作者简介: 曹寰琦(1992—),女,硕士研究生,主要从事沙漠气象研究. E-mail: caohuanqi821@qq.com
通讯作者: 何清. E-mail: qinghe@idm.cn

量各分量在不同时间尺度上的变化特征,探讨塔克拉玛干沙漠北缘能量闭合状况,有助于进一步揭示流动沙漠下垫面能量平衡闭合特征,为深入了解塔克拉玛干沙漠的物质与能量循环和气候变化过程奠定基础,为进一步评价该地区水、热结构模式提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

肖塘陆—气相互作用观测站(图1)位于塔克拉玛干沙漠北缘(40°48′N,84°18′E,海拔912 m),该地区属于内陆暖温带荒漠气候,气候极端干旱,潜在蒸发大,属于典型的沙漠—绿洲过渡带。观测试验点位于距离沙漠公路肖塘1号井1 000 m的沙漠中,地处古河床南岸,北距胡杨林约2 km,下垫面为平坦沙面,部分地区有裸露的古河床,无植被覆盖,受人类活动影响较小,周围有新月形沙丘和复合型新月形沙丘链,春夏季节经常发生快速移动,沙丘单体走向为NW－SE,一般宽为6～15 m,高1～10 m。年平均降水量15.2 mm,年平均风速为2.5 m·s^{-1}[13－14]。

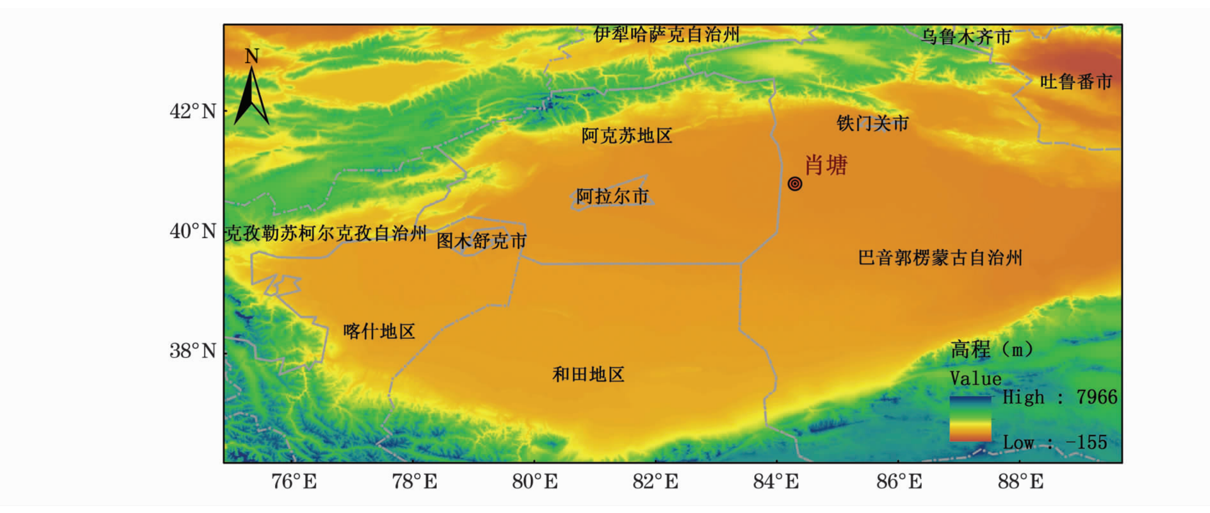


图1 肖塘陆—气相互作用观测站地理位置示意图

Fig. 1 The location of Xiaotang land－atmospheric interation observation station

表1 肖塘实验仪器

Tab. 1 The instrument of the experimentation in XiaoTang

观测项目	传感器型号	产地厂家	采集频率	安装高、深度	输出数据
土壤热通量	HFP01	Hukseflux	10 s	5,10 cm	30 min
土壤温度	109L	美国 Campbell	1 min	0,－10,－20,－40 cm	30 min
土壤湿度	CS616	美国 Campbell	1 min	－2.5,－10,－20,－40 cm	30 min
风向风速	010C020C	美国 Campbell	1 s	0.5,1,2,4,10 m	30 min
空气湿度	HMP45C	芬兰 VAISALA	10 s	0.5,1,2,4,10 m	30 min
水热通量	CSAT3/Li－Cor7500	美国 Li－Cor	10 Hz	3 m	30 min
辐射分量	CNR－1	荷兰 Kipp&Zonen	1 s	1.5 m	30 min

1.2 观测仪器

本次实验仪器主要包括:试验场沙地中埋有的土壤温度传感器、土壤湿度传感器、土壤热通量板,还架设有四分量净辐射表,涡动相关系统。

1.3 数据处理

研究能量平衡闭合特征所用资料需保证各通量分量时间同步,对数据进行筛选,故选用数据较全的2014年7月—12月资料,主要讨论夏季和秋季的变化特征,本文所用数据均为地方时。

1.3.1 数据矫正 肖塘的能量数据是地方时,沙尘数据和云量是北京时。由计算可知,肖塘与北京的时差是2 h 22 min 48 s,需根据计算将沙尘数据和云量矫正为地方时。

1.3.2 数据剔除 本文使用Li－Cor公司的EddyPro软件,对涡动相关系统观测数据进行质量控制,剔除质量控制码(Q_c)为2以下的错误数据,只保留质量控制码为0和1的数据,以及$|H|<10$ W·m^{-2}的数据[15]。此外,剔除明显异常数据。对于

1 h 内因去噪、断电、天气因素等缺失的数据,根据相邻数据进行线性插补,1 h 以上缺失数据用平均日变化法进行插补[16]。

1.4 数据分析

1.4.1 地表土壤热通量　地表土壤热通量运用 TDEC(thermal diffusion equation + Correction)法[17],利用埋设在地表下的土壤温度计及土壤湿度计测量值进行计算,即:

若给定温度廓线为 $T(Z_i)$,假设在任一参考位置(Z_{ref})的热通量 $G(Z_{ref}) \approx 0$,则利用方`

$$G_i = G(Z_{ref}) + \frac{1}{\Delta t}\sum_{Z_{ref}}^{Z}[\rho_s C_s(Z_i, t+\Delta t)T(Z_i, t+\Delta t) - \rho_s C_s(Z_i, t)T(Z_i, t)]\Delta z \qquad (1)$$

式中:由于表层的温度梯度变化大,在计算中采用了扩展网格,即表层网格较密,底层网格较稀,Δz 代表其网隔间距(m),Δt 代表温度在网格之间传递产生的时间差(s);G_i 为土壤热通量($W \cdot m^{-2}$);$\rho_s C_s$ 是土壤热容量($J \cdot kg^{-1} \cdot k^{-1}$);$Z_i$ 代表土壤深度(向下为正)(m);$T(Z_i, t)$代表在 t 时刻 Z_i 深度下的土壤温度(K)。

1.4.2 湍流通量计算方法　涡动相关技术是通过测定和计算物理量(如温度、CO_2、H_2O 等)的脉动与垂直风速脉动的协方差求算湍流输送通量的方法。本文利用 EddyPro 4.4.1 软件计算湍流通量,其中,感热通量与潜热通量公式如下:

$$H = \rho C_p \overline{w'T'} \qquad (2)$$

$$LE = \rho\lambda \overline{w'q'} \qquad (3)$$

式中:ρ 为空气密度;w' 为垂直风速脉动;T' 为温度脉动;q' 为比湿脉动;C_p 为定压比热,一般取值为 1 004.67 $J \cdot kg^{-1} \cdot ℃^{-1}$;$\lambda$ 为水的汽化潜热,一般取值为 2.5×10^6 $J \cdot kg^{-1}$。

1.4.3 地表能量平衡方程　根据热力学第一定律可知,能量既不会凭空产生,也不会凭空消失,只能从一种形式转化为另一种形式。在能量平衡研究中,地表能量平衡方程可表示为:

$$H + LE = R_n - G - S - Q \qquad (4)$$

式中:H 为感热通量;LE 为潜热通量;R_n 为净辐射;G 为浅层土壤热通量;取地表以下 5 cm 处土壤热通量;S 为冠层热储量;Q 为附加能量源汇的总和单位均为 $W \cdot m^{-2}$。由于研究区位于塔克拉玛干沙漠北缘的沙漠中,没有植被覆盖,Q 项值通常很小,对研究能量闭合的影响极小,故 S、Q 忽略不计[16]。能量平衡方程又可表示为:

$$H + LE = R_n - G \qquad (5)$$

1.4.3 地表能量平衡闭合程度的分析方法　本文采用能量平衡比率 EBR 法(energy balance ratio)以及最小二乘法(ordinary least square),对塔克拉玛干沙漠北缘肖塘地区地表能量闭合程度进行分析。

(1) 利用湍流通量($H + LE$)与可利用能量($R_n - G$)的比值 EBR 分析其地表能量闭合程度。

$$EBR = \frac{H + LE}{R_n - G} \qquad (6)$$

(2) 将湍流通量($H + LE$)和可利用能量($R_n - G$)进行线性回归分析,回归系数中,斜率即代表地表能量闭合程度。在理想的能量平衡状况下,湍流通量和有效能量的回归直线斜率应该等于 1 且直线通过原点。

2 结果与分析

2.1 能量通量各分量月平均日变化特征

为了直观地反映出各通量的日变化特征,对 2014 年 7—12 月肖塘试验站 30 min 通量数据的平均值进行汇总,绘出每 30 min 通量的月平均日变化曲线。

塔克拉玛干沙漠北缘肖塘地区的能量通量分量的各月平均日变化有相似的变化趋势,几乎都呈明显的单峰形曲线变化,除潜热通量外,其他分量均具有明显的季节变化特征,呈现出夏季 > 秋季 > 冬季的变化趋势。

肖塘地区净辐射夜间变化不大,日出前达到最小,日出后迅速增大,均于中午达到最大值,净辐射的最大值于 8 月出现,达到 381.5 $W \cdot m^{-2}$,12 月最小,为 167.6 $W \cdot m^{-2}$,净辐射的变化特征主要与太阳高度角相对应,与水汽和云况有关[18]。沙尘天气在风的作用下,大气扰动比较强烈,湍流运动从地面向大气传输的热量通量有所增加,该地区气象资料显示,夏季沙尘天气较多,仅 7 月和 8 月就高达 45 d,占 7—12 月总沙尘天气总天数的 75%,地表温度较高,湍流交换比较强烈,秋季逐渐减弱,12 月无沙尘天气,故感热通量夏季最大,秋季次之,冬季最小,7 月中午 12:00 达峰值 198.3 $W \cdot m^{-2}$。沙漠地区降水量极少,地表干燥,并且几乎没有植被覆盖,故潜热通量始终变化较小且极其微弱。夏季到达地表

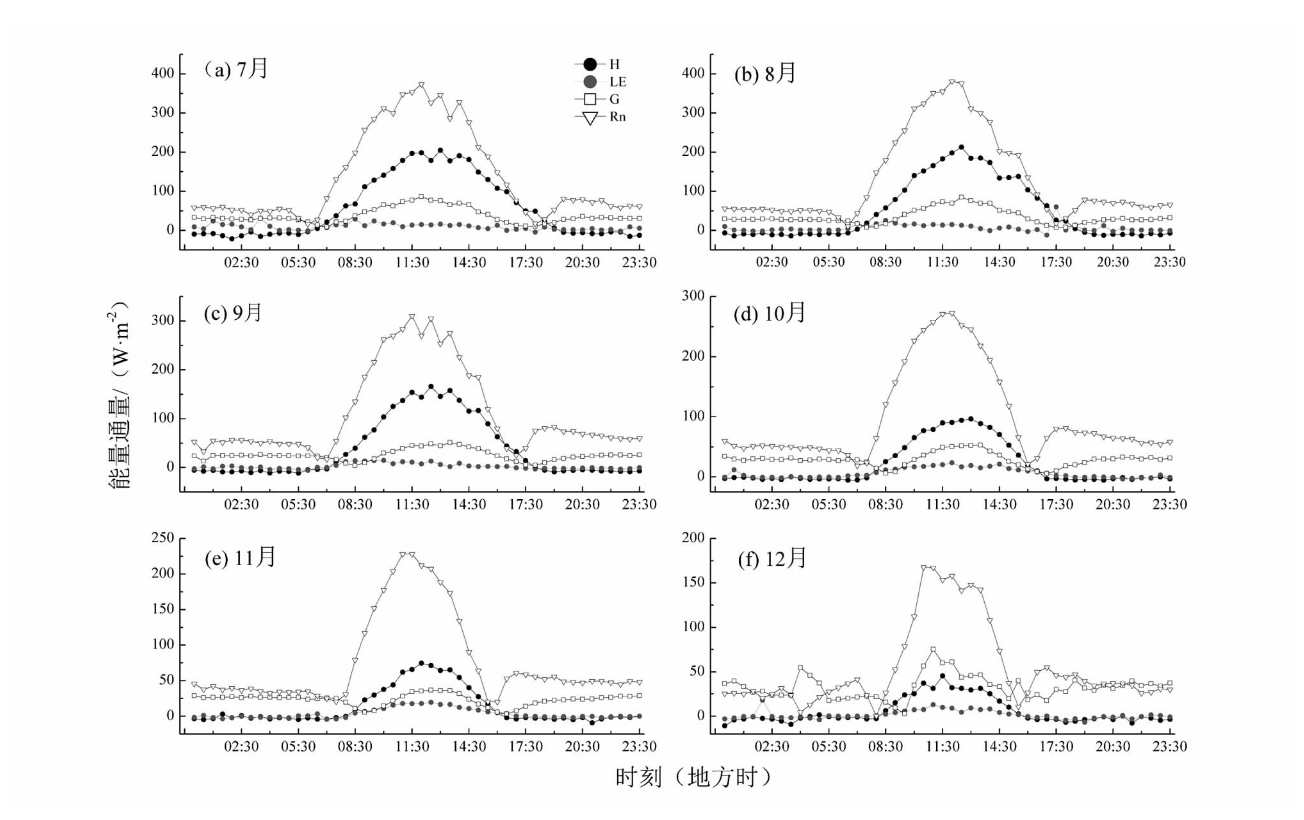


图2 能量通量分量月平均日变化特征

Fig. 2 Monthly mean diurnal variations of energy flux

的太阳辐射加强，地表温度升高，土壤热通量值较大，自9月太阳辐射逐渐减弱，土壤热通量值逐渐减小。

2.2 能量平衡闭合程度变化特征

2.2.1 总体能量平衡闭合特征 图3、图4和图5分别对5 cm和地表土壤热通量下塔克拉玛干沙漠北缘肖塘地区白天、夜间以及全天的能量平衡闭合程度进行分析，肖塘地区能量不闭合现象非常明显，白天和夜间的能量闭合程度差异很大。5 cm土壤热通量下白天、夜间及全天的能量闭合程度分别为59.6%、15.7%和62.4%；地表土壤热通量下的能量闭合程度分别为56.6%、38.3%和64.1%。可以看出，地表土壤热通量下的夜间能量闭合较5 cm处有很大的提高，而白天差别不大。全天地表能量平

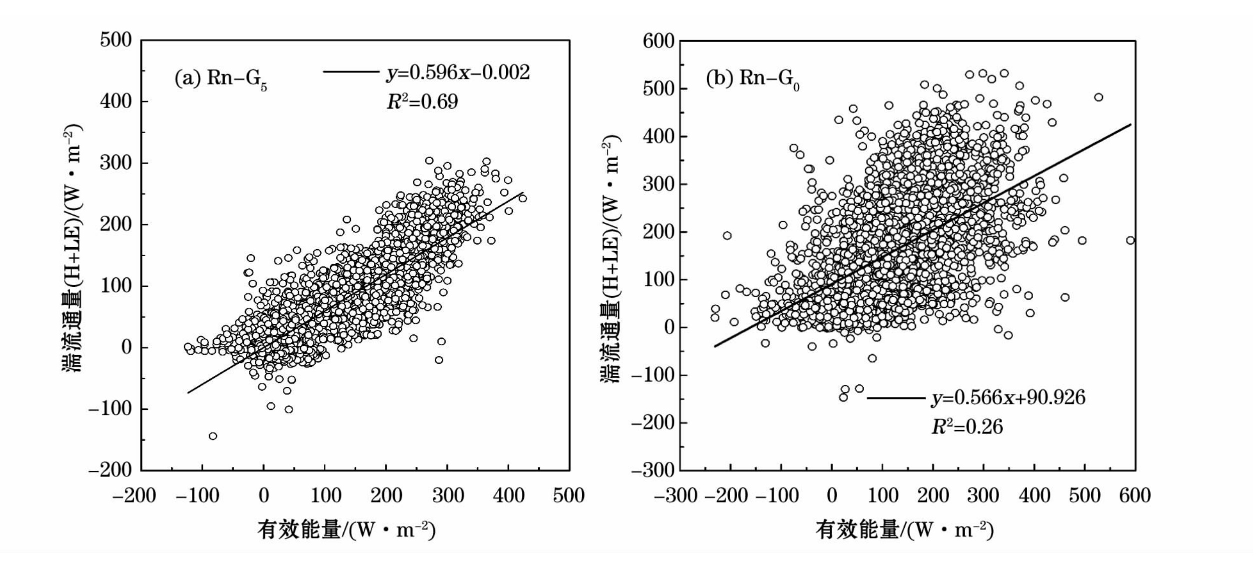


图3 5 cm和地表土壤热通量下的白天能量闭合特征

Fig. 3 Analysis of daytime energy closure under 5cm and surface soil heat flux

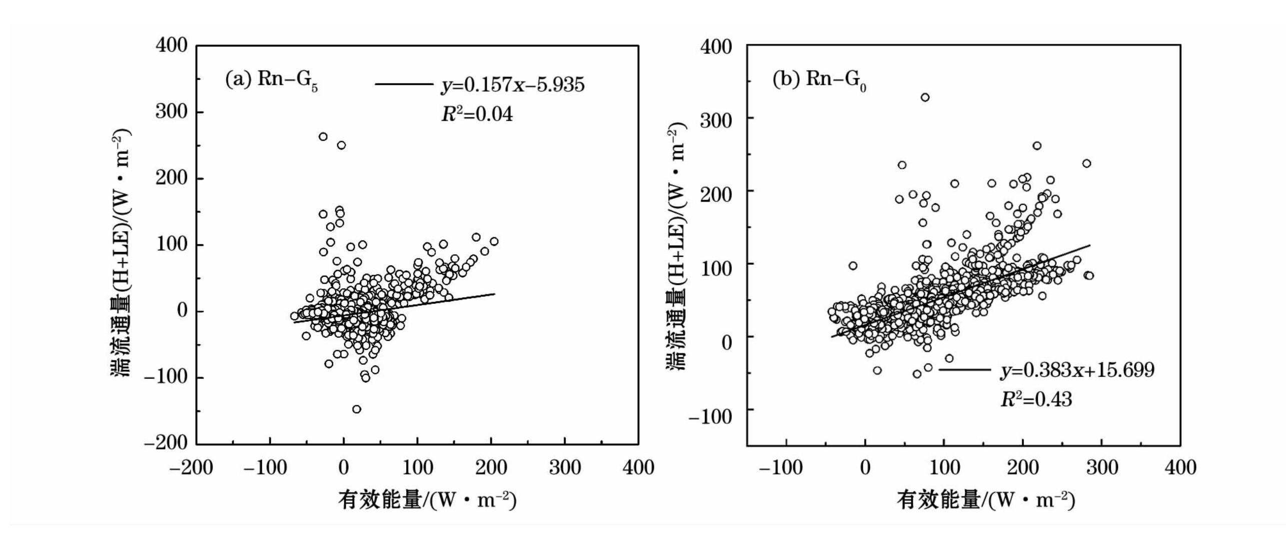


图 4　5 cm 和地表土壤热通量下的夜间能量闭合特征

Fig. 4　Analysis of nocturnal energy closure under 5cm and surface soil heat flux

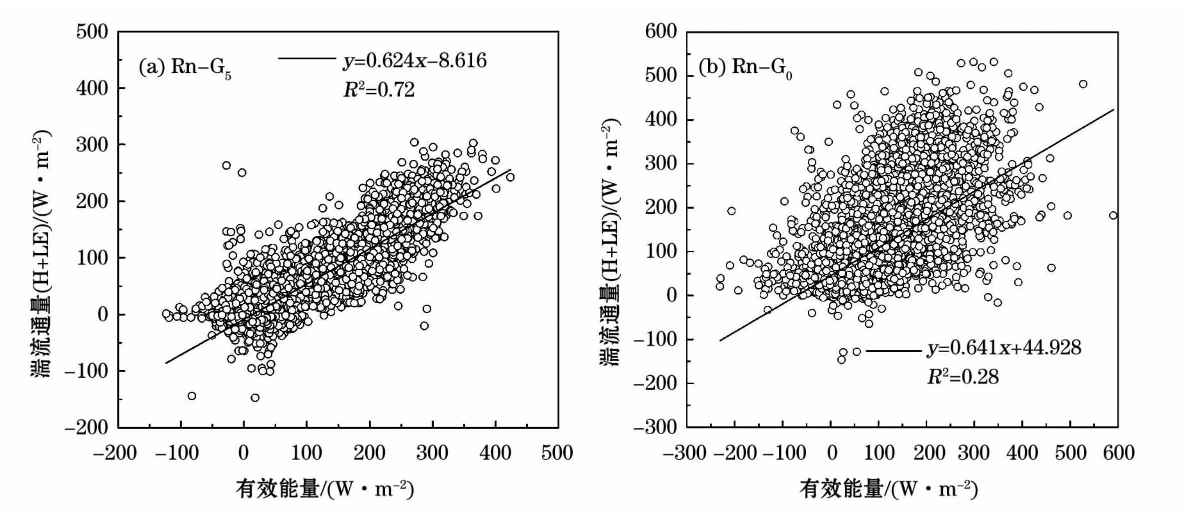


图 5　5 cm 和地表土壤热通量下的全天能量闭合特征

Fig. 5　The full - day energy closure analysis of 5cm and surface soil heat flux

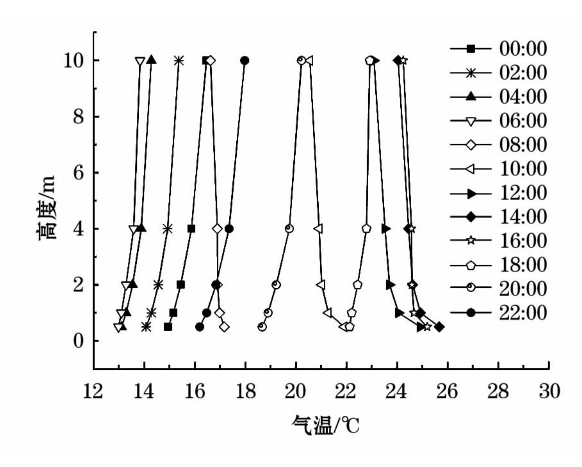


图 6　气温梯度变化特征

Fig. 6　Analysis of tempeterature gradient variation

衡闭合程度提高了 1.7%。对 7—12 月不同高度时气温的日平均变化进行分析,傍晚 17:30 至次日 06:30 气温随高度的升高而升高,存在逆温现象(图 6)。夜间,能量不闭合程度较高,大气一般都处于稳定层结或低湍流状态下,还会产生逆温层,垂直方向的湍流交换弱且摩擦风速较低[19],这一点与 Foken [20]有关白天和夜间能量闭合特征分析的研究结果相一致。对肖塘、黑河下游内蒙古额济纳旗荒漠河岸[21]、腾格里沙漠南缘[22]、兰州大学 SACOL 站[23]和新疆塔里木河下游荒漠河岸[19]等干旱区晴天下能量闭合率进行比较发现,结果相差不大(表 2),表明干旱区不同地点在能量闭合程度的研究上有着一致结果,能量闭合程度都不是很好,总体能量闭合率肖塘明显低于塔里木河下游荒漠河岸,说明该地区独有的沙漠风沙对肖塘能量平衡闭合有着很大的影响。

表 2 不同地区能量闭合率比较

Tab. 2 Comparison of energy balance ratio in different regions of arid area

地点	年份	下垫面(植被)	能量闭合率/%	
			晴天	总体
肖塘	2014	干沙地(无)	74.8	62.4
黑河下游荒漠河岸	2013	黏土(胡杨)	70.5	–
腾格里沙漠南缘	2010	湿沙地(玉米)	68	–
兰州大学 SACOL 站	2008	黄土(天然荒草)	75.7	–
塔里木河下游荒漠河岸	2011	土壤(柽柳)	77	72.3

表 3 各月湍流通量和有效能量的线性回归

Tab. 3 Monthly linear regression of turbulent flux and effective energy

观测时间	斜率	截距	R^2
7 月	0.746	-6.571	0.80
8 月	0.723	-12.264	0.74
9 月	0.676	-19.033	0.78
10 月	0.523	-8.336	0.70
11 月	0.450	-5.664	0.70
12 月	0.254	3.156	0.35

由各月湍流通量和有效能量的线性回归(表 3)可知,肖塘地区的能量闭合程度 7—12 月逐月递减。由于夏季沙尘天气较多,气温高,空气与地表的热量传递现象剧烈,感热通量与土壤热通量均高于秋冬季节,且夏季降雨天气较多,潜热通量也略有升高,故 7 月和 8 月能量闭合程度较高,7 月最高可达 74.6%。

2.2.2 能量平衡闭合率日变化特征 图 7 给出了肖塘地区 7—12 月湍流通量、有效能量以及能量平衡闭合率 EBR 的平均日变化曲线,可以看出,EBR 日变化规律明显,夜间能量闭合率为负,在日出日落时段,(R_n-G) 值趋近于零,能量闭合率发生剧烈波动,在 6:30,能量闭合率迅速变为正值达到 31.2%,随着时间的推移,能量闭合率呈现出平缓增长的变化趋势,下午能量闭合率明显高于早晨,且白天 EBR 值大都处于 0~1 之间,傍晚时分 EBR 值急速下降,于 19:00 变为负值。由于平均日变化消除了逐日差异,只能反映能量闭合率的共同特征以及一般趋势,不能反映其在数量上的长期统计特征,所以,在一天的任何时段都有可能出现异常闭合的情况[24]。夜间异常闭合现象明显高于白天,且 EBR 分布较之白天更为发散。夜间各通量分量的值都较小,而 EBR 是以比值的形式展现的,故夜间更易出现异常值是可以理解的。

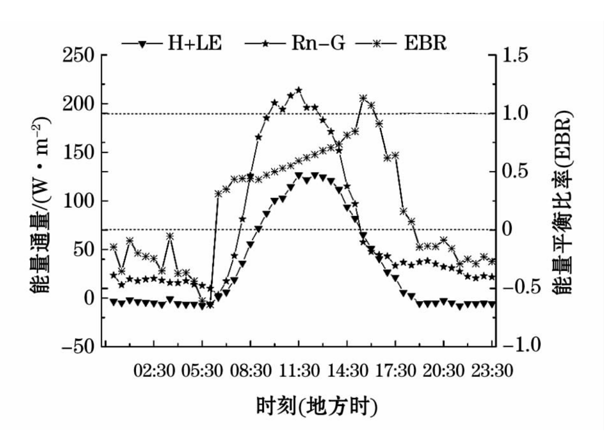


图 7 湍流通量、有效能量、EBR 日变化

Fig. 7 Diurnal variation of turbulent flux, effective energy and EBR

2.3 不同天气下能量平衡闭合特征分析

为了更加全面地了解塔克拉玛干沙漠北缘能量平衡闭合特征,根据实际观测的气象资料将其分为晴天、阴天、降雨和沙尘暴 4 种天气类型。经统计,2014 年 7—12 月晴天总数达 63 d,阴天总数 37 d,有沙尘暴天气出现 13 d(能见度 <800 m),出现降雨天气 33 d,降雨总量 26.5 mm。并挑选 7 月 23 日、8 月 9 日(低云量十成)、7 月 18 日(夜间降水量 0.8 mm,白天降水量 0.3 mm)以及 7 月 16 日(10:33—14:48)4d 的资料,分别代表肖塘地区的晴天、阴天、降雨和沙尘暴天气。对晴天、阴天、降雨、沙尘暴 4 种天气的能量通量分量(图 8)以及能量分配(图 9)关系进行分析,从而了解肖塘地区净辐射的主要消耗形式,有助于整体把握该地区地表能量闭合状况。

根据图 8~10 可以看出,晴天时,除潜热通量以外,其他分量都具有非常明显的日变化特征,净辐射变化趋势为一条平滑的倒"U"形曲线,于 12:30 达到峰值 403.6 W · m^{-2},感热通量的日变化曲线与净辐射有着相似的变化趋势,由于受下垫面、平流等复杂因素影响下的间歇性湍流传输所致,日变化曲线不如净辐射平滑[22]。白天时,随着太阳辐射加热地表,主要以感热形式进行能量交换,于 13:30 达到峰值 240.0 W · m^{-2},日落以后,太阳辐射减弱,地表逐渐冷却,感热通量变为负值。夜间,土壤向地表传输热量,土壤热通量为主要的能量交换形式,于 11:30 达到峰值,为 132.9 W · m^{-2},比净辐射早 1 h 达到峰值,潜热通量于 10:30 达到峰值 28.7 W · m^{-2}。在能量分配方面,白天 H/R_n 比 G/R_n 值大,夜

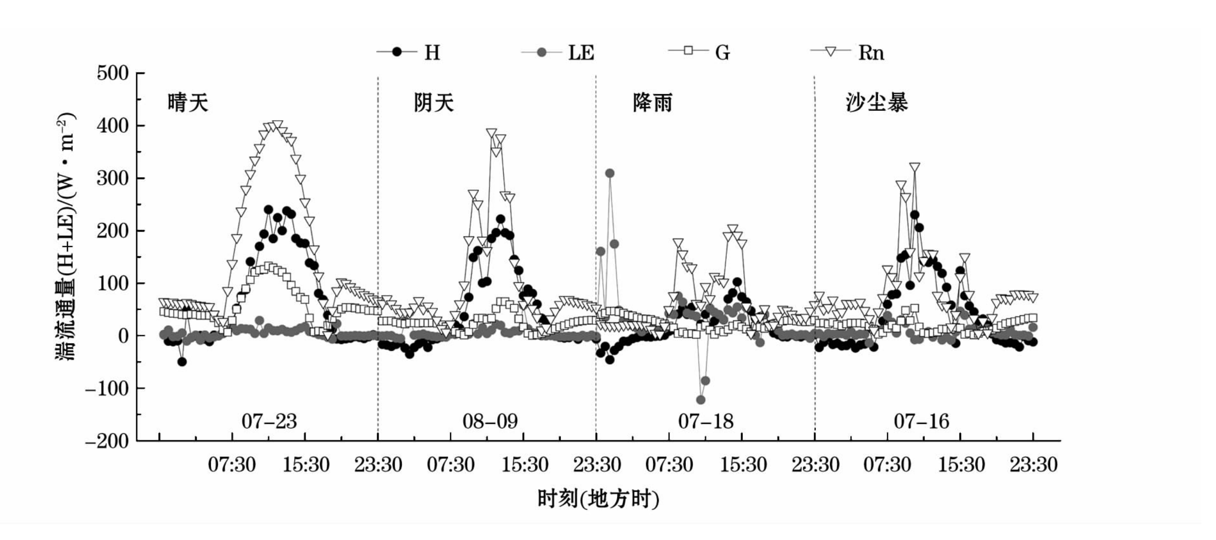


图 8　不同天气下能量通量各分量日变化特征

Fig. 8　Diurnal variations of energy flux in the different weather

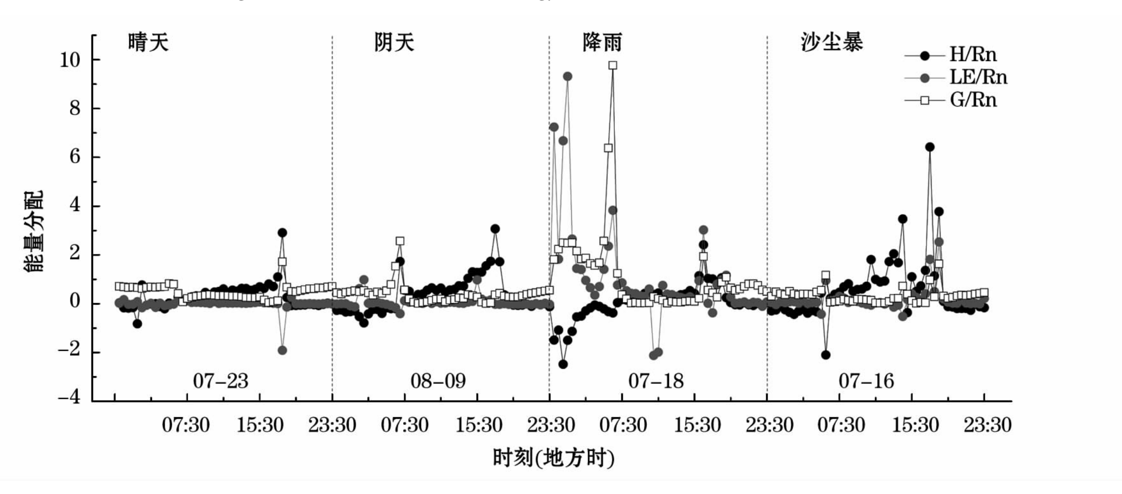


图 9　不同天气下能量分配日变化特征

Fig. 9　Diurnal variations of energy distribution in the different weather

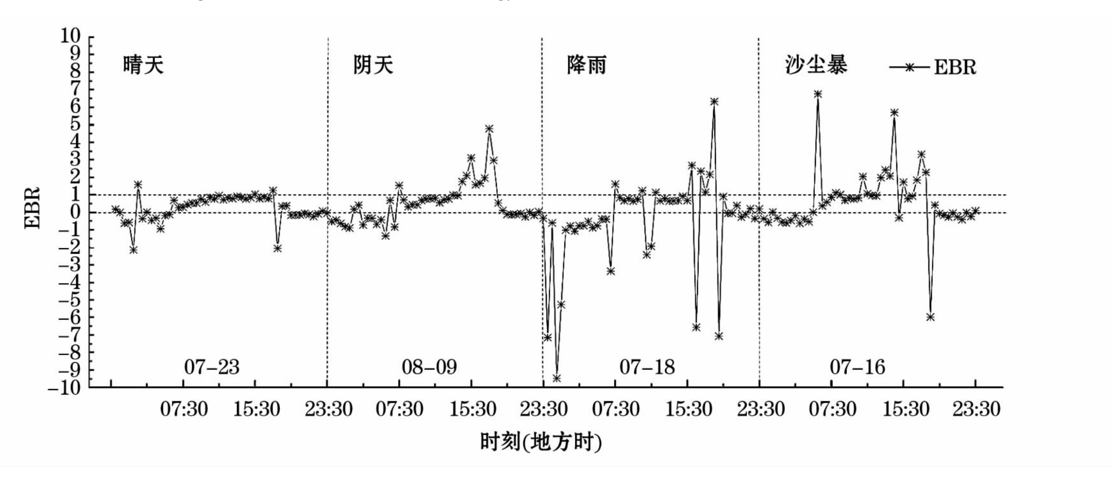


图 10　不同天气下 5 cm 土壤热通量下能量闭合率日变化特征

Fig. 10　Diurnal variations of energy balance ratio under 5cm soil heat flux in the different weather

间刚好相反,在 7:00—7:30 和 18:00—18:30 时相交,LE/R_n 全天变化不大,始终较为微弱,晴天肖塘地区感热通量、潜热通量和土壤热通量分别占净辐射 57.7%、2.1%、38.4%,这说明在晴天时,感热通量和土壤热通量为主要的能量消耗形式,潜热通量形式的能量消耗极小,主要是晴天地表较为干旱,土

壤的含水量极低所致。晴天能量平衡闭合率白天大于夜间,并且变化较为平缓,异常闭合现象较少,在日出日落时段有少量异常闭合现象出现,日出后 EBR 在区间 0~1 之间呈现出平缓增长的趋势,剔除异常闭合数据的 EBR 日平均值为 73.6%。

阴天时,天空中低云量达到十成,在云的遮蔽作用下,到达地表的太阳辐射量有所减少,地面温度较之晴天降低,地—气之间的湍流作用减弱,感热通量与晴天相比有小幅度减小,于 13:00 到达峰值 222.1 W·m^{-2}。净辐射不再是平滑的单峰形曲线,具有一定的波动。阴天由于地表湿度加大,地面的蒸发比晴天时略微增强,故潜热通量在阴天时有小幅度增大,峰值达到 57.9 W·m^{-2}。地面温度降低导致土壤热通量有一定程度的减小,在 13:00 时达到峰值 64.5 W·m^{-2}。在能量分配方面,阴天肖塘地区感热通量、潜热通量、土壤热通量分别占净辐射 49.4%、5.8%、31.5%,这说明虽然在阴天时潜热通量有所增大,但是增加幅度极小,故还是以感热通量和土壤热通量为主要的能量消耗形式,白天以感热通量为主,夜间以土壤热通量为主。阴天能量平衡闭合率变化特征曲线与晴天相似,但阴天的 EBR 波动较大,过闭合现象与晴天相比较多,剔除异常闭合数据的 EBR 日平均值为 65.3%。

塔克拉玛干沙漠降雨极少,选取的 2014 年 7 月 18 日降水总量为 1.1 mm,其中夜间降水量 0.8 mm,白天(5:50—6:05、6:22—6:41、10:56—11:24)降水量 0.3 mm。从图 8~10 我们可以看出,能量通量各分量波动较为剧烈,因为降雨天气的光照强度与其他天气相比较弱,净辐射变化最为明显,受到摩擦风速和湍流通量的影响,峰值较不稳定,呈现出双峰变化趋势,5:50—6:41 有降雨,降雨过后净辐射值逐渐增大,于 8:30 达到峰值 178.6 W·m^{-2},随着太阳高度角、光照强度、地表温度等因素的变化,净辐射于 11:00 达到谷值,为 57.8 W·m^{-2},在 11:24 降雨结束之后,天气逐渐放晴,净辐射于 14:30 达到第 2 个峰值 205.0 W·m^{-2}。当天气温较低,全天最高温度仅 28.3 ℃,感热通量值较低,15:00 达到最大 102.3 W·m^{-2}。降雨天气潜热通量比其他天气有明显增高,随着 7 月 17 日的降水以及当日的夜间降水,地表蒸发加强,潜热通量于 1:00 达到一个高值 309.3 W·m^{-2},由于夜间降水量高于白天,潜热通量于 8:30 达到第 2 个高值 75.5 W·m^{-2},随后 11:00 有降水,潜热通量达到低值 −122.5 W·$^{-2}$。当日土壤热通量波动极小,且夜间高于白天。能量分配在当日潜热通量有明显优势,所占比例极高,LE/R_n 大于 1 的情况出现较多,一般降雨前后时刻潜热通量大于净辐射值,因为净辐射、光照强度等在降雨前后较低,是潜热通量瞬间增大所导致的。异常闭合现象在降雨天气出现频繁,异常闭合点在降雨时段出现较为明显,而且 EBR 值出现区间明显大于其他天气,主要还是与潜热通量的变化有关,所以,温度和水分对能量闭合率的影响较大,剔除异常闭合数据的 EBR 日平均值为 47.9%。

沙尘暴天气下净辐射和感热通量日变化有较大波动,净辐射和感热通量均于 10:30 达到最大值,分别为 322.9 W·m^{-2} 和 230.3 W·m^{-2},沙尘暴从 10:33 开始至 14:48 结束历时 4 h 15 min,沙尘暴天气开始时,由于云量、能见度以及光照强度等的影响,净辐射迅速降低,于 14:30 达到一个谷值 16.7 W·m^{-2},之后随着沙尘暴天气的停止,净辐射开始上升,于 16:00 达到另一高值,为 150.2 W·m^{-2},净辐射夜间的变化趋势相差不大。土壤热通量全天变化不大,也于 10:30 到达峰值,为 52.1 W·m^{-2}。沙尘暴天气下能量分配方面感热通量和土壤热通量占净辐射的比例分别是 56.2% 和 33.0%,潜热通量所占比例依旧很小,还是以感热通量和土壤热通量为主要的能量消耗形式。当日 7:04—10:33 以及 16:15—18:38 分别有扬沙和浮沉天气出现,由图 10 可以看出,在有天气出现的时刻及其前后易有异常闭合现象发生,沙尘天气能量闭合率也较为发散,剔除异常闭合数据的 EBR 日平均值为 54.7%。

3 结 论

(1)塔克拉玛干沙漠北缘能量通量各分量中午呈倒“U”形单峰变化特征,且除潜热通量外,其他分量均具有明显的季节变化特征,表现为夏季 > 秋季 > 冬季。

(2)通过对塔克拉玛干沙漠北缘的湍流通量和有效能量进行线性回归分析,得出该地区 5 cm 土壤热通量下的能量平衡闭合程度全天为 62.4%、白天 59.8%、夜间 15.7%。地表土壤热通量下的能量平衡程度全天为 64.1%、白天 56.6%、夜间 38.3%,计算出地表土壤热通量对能量闭合改善并不明显,

且能量闭合程度具有较明显的月变化特征,表现为逐月递减趋势,7 月最好,达 74.6%,12 月最差,为 25.4%。

(3)能量闭合率在日出日落时段波动剧烈,夜间为负,6:30 变为正值,随后呈现出平缓增长的变化趋势,下午能量闭合率明显高于早上,傍晚 EBR 急速下降,于 19:00 降为负值。夜间异常能量闭合现象高于白天,且 EBR 分布更为发散。

(4)在不同天气的影响下,能量通量分量变化、能量分配以及能量平衡比率都有一定的差异,晴天能量通量各分量均呈倒"U"形单峰变化,阴天、降雨、沙尘暴天气各分量都随着天气现象的进行而有较大的波动,呈现出双峰或多峰变化趋势,降雨天气潜热通量有明显增长。除降雨天气外,其他天气现象下净辐射的消耗形式均是,白天以感热通量为主,夜间以土壤热通量为主,降雨天气以潜热通量为主。EBR 在晴天和阴天变化不大,符合 EBR 的一般变化趋势,降雨和沙尘暴天气下,天气现象到来,会有瞬时异常闭合现象出现。能量闭合率晴天 > 阴天 > 沙尘暴 > 降雨。

参考文献(References):

〔1〕 陈琛. 淮河流域农田生态系统能量平衡与闭合研究〔D〕. 合肥:安徽农业大学,2012.〔Chen Chen. Observational Study of Surface Energy Balance and Energy Closure in the Farmland Ecosystems in Huaihe River Basin〔D〕. Hefei:Anhui Agricultural University,2012.〕

〔2〕 杨启东,左洪超,杨扬,等. 近地层能量闭合度对陆面过程模式影响〔J〕. 地球物理学报,2012,55(9):2 876 – 2 888.〔Yang Qidong,Zuo Hongchao,Yang Yang,et al. On the effect of the near – surface layer energy closure degree on the land surface process simulations〔J〕. Chinese Journal of Geophys,2012,55(9):2 876 – 2 888.〕

〔3〕 Heusinkveld B G,Jacobs A F G,Holtslag A A M,et al. Surface energy balance closure in an arid region: role of soil heat flux〔J〕. Agricultural and Forest Meteorology,2004,122(1/2):21 – 37.

〔4〕 Gao Z. Determination of soil heat flux in a Tibetan short – grass prairie〔J〕. Boundary – Layer Meteorology,2005,114(1):165 – 178.

〔5〕 王介民,王维真,刘绍民,等. 近地层能量平衡闭合问题—综述及个例分析〔J〕. 地球科学进展,2009,24(7):705 – 713.〔Wang Jiemin,Wang Weizhen,Liu Shaomin,et al. The problems of surface energy balance closure:An overview and case study〔J〕. Advances in Earth Science,2009,24(7):705 – 713.〕

〔6〕 Wilson K,Goldstein A,Falge E,et al. Energy balance closure at FLUXNET sites〔J〕. Agricultural and Forest Meteorology,2002,113(1):223 – 243.

〔7〕 Stoy P C,Mauder M,Foken T,et al. A data – driven analysis of energy balance closure across FLUXNET research sites:The role of landscape scale heterogeneity〔J〕. Agricultural and forest meteorology,2013,171:137 – 152.

〔8〕 李正泉,于贵瑞,温学发,等. 中国通量观测网络(ChinaFLUX)能量平衡闭合状况的评价〔J〕. 中国科学 D 辑:地球科学,2004,34(增刊 2):46 – 56.〔Li Zhengquan,Yu Guirui,Wen Xuefa,et al. Evaluation of the energy balance closure of China FLUX observation network〔J〕. Scientia Sinica(Terrae),2004,34(Suppl. 2):46 – 56.〕

〔9〕 岳平,张强,牛生杰,等. 半干旱草原下垫面能量平衡特征及土壤热通量对能量闭合率的影响〔J〕. 气象学报,2012,70(1):136 – 143.〔Yue Ping,Zhang Qiang,Niu Shengjie,et al. Characters of surface energy balance over a semi – arid grassland and effects of soil heat flux on energy balance closure〔J〕. Acta Meteorologica Sinica ,2012,70(1):136 – 143.〕

〔10〕 张强,李宏宇. 黄土高原地表能量不闭合度与垂直感热平流的关系〔J〕. 物理学报,2010,59(8):5 889 – 5 896.〔Zhang Qiang,Li Hongyu. The relationship between surface energy balance unclosure and vertical sensible heat advection over the loess plateau〔J〕. Acta Physica Sinica,2010,59(8):5 889 – 5 896.〕

〔11〕 Yue P,Li Y,Zhang Q,et al. Surface energy – balance closure in a gully region of the Loess Plateau at SACOL on eastern edge of Tibetan Plateau〔J〕. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II,2012,90c:173 – 184.

〔12〕 张佩,袁国富,朱治林. 荒漠河岸林涡度相关通量测定中平均时间的确定及其对通量计算的影响〔J〕. 干旱区地理,2013,36(1):400 – 408.〔Zhang Pei,Yuan Guofu,Zhu Zhilin. Determination of the averaging period of Eddy covariance measurement and its influences on the calculation of fluxes in desert riparian forest〔J〕. Arid Land Geography,2013,36(1):400 – 408.〕

〔13〕 王延慧,买买提艾力·买买提依明,何清,等. 塔克拉玛干沙漠北缘地表能量收支特征〔J〕. 沙漠与绿洲气象,2014,8(3):34 – 41.〔WangYanhui,Ali Mamtimin,He Qing,et al. Characteristics of energy budget in the northern margin of the Taklimakan Desert〔J〕. Desert and Oasis Meteorology,2014,8(3):34 – 41.〕〔14〕张文斌,买买提艾力·买买提依明,何清,等. 塔克拉玛干沙漠不同区域土壤热通量比较〔J〕. 沙漠绿洲与气象,2016,10(2):57 – 62.〔Zhang Wenbin,Ali Mamtimin,He Qing,et al. Comparison of the soil heat flux variations in different areas over the Taklimakan Desert〔J〕. Desert and Oasis Meteorology,2016,10(2):57 – 62.〕

〔15〕 Yang K,Koike T,Ishikawa H,et al. Turbulent flux transfer over bare – soil surfaces:Characteristics and parameterization〔J〕. Journal of Applied Meteorology and Climatology,2008,47(1):276 – 290.

〔16〕 朱治林,孙晓敏,温学友,等. 中国通量网(China FLUX)夜间 CO_2 涡度相关通量数据处理方法研究〔J〕. 中国科学 D 辑:地球科学,2006,36(增刊 1):34 – 44.〔Zhu Zhilin,Sun Xiaomin,WenXueyou,et al. Study on the related FLUX data processing of China FLUX network nocturnal CO_2 vorticity〔J〕. Scientia Sinica(Terrae),2006,36:34 – 44(Suppl. 1).〕

〔17〕 阳坤,王介民. 一种基于土壤温湿资料计算地表土壤热通量的

温度预报校正法〔J〕. 中国科学 D 辑:地球科学,2008,38(2):243 - 250.〔Yang Kun, Wang Jiemin. A temperature prediction and correction method based on soil temperature and humidity data is used to calculate the heat flux of surface soil〔J〕. Scientia Sinica (Terrae),2008,38(2):243 - 250.〕

〔18〕 李泉,张宪洲,石培礼,等. 西藏高原高寒草甸能量平衡闭合研究〔J〕. 自然资源学报,2008,22(3):391 - 399.〔Li Quan, Zhang Xianzhou, Shi Peili, et al. Study on the energy balance closure of alpine meadow on Tibetan Plateau〔J〕. Journal of Natural Resources,2008,22(3):391 - 399.〕

〔19〕 马虹,陈亚宁,李卫红. 荒漠河岸柽柳(Tamarix chinensis)灌丛的能量平衡特征〔J〕. 中国沙漠,2014,34(1),108 - 117.〔Ma Hong, Chen Yaning, Li Weihong. Characteristics of energy balance of riparian Tamarix shrubs in desert〔J〕. Journal of Desert Research,2014,34(1):108 - 117.〕

〔20〕 Foken T. The energy balance closure problem: An overview〔J〕. Ecological Applications,2008,18(6):1 351 - 1 367.

〔21〕 马小红,苏永红,鱼腾飞,等. 荒漠河岸胡杨林生态系统涡度相关通量数据处理与质量控制方法研究〔J〕. 干旱区地理,2015,38(3):626 - 635.〔Ma Xiaohong, Su Yonghong, Yu Tengfei, et al. Data processing and quality control of eddy covariance in desert riparian forest〔J〕. Arid Land Geography, 2015, 38(3):626 - 635.〕

〔22〕 杨彦龙,左洪超,赵舒曼,等. 夏季晴天沙漠绿洲非均匀下垫面地表能量平衡分析〔J〕. 干旱气象,2016,34(3):412 - 422.〔Yang Yanlong, Zuo Hongchao, Zhao Shuman, et al. Analysis of surface energy balance in desert - oasis heterogenous underlying surface in sunny day of Summer〔J〕. Journal of Arid Meteorology, 2016,34(3):412 - 422.〕

〔23〕 岳平,张强,赵文,等. 黄土高原地表能量闭合特征及土壤通量参数化〔J〕. 冰川冻土,2012,34(3):583 - 590.〔Yue Ping, Zhang Qiang, Zhao Wen, et al. Surface energy - balance closure features and parameterization of soil heat flux on the Loess Plateau〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2012,34(3):583 - 590.〕

〔24〕 原文文,同小娟,张劲松,等. 黄河小浪底人工混交林生长季能量平衡特征. 生态学报,2015,35(13):4 492 - 4 499.〔Yuan Wenwen, Tong Xiaojuan, Zhang Jinsong, et al. Characteristics of energy balance of a mixed plantation in the Xiaolangdi area in the growing season〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2015,35(13):4 492 - 4 499.〕

Characteristics of Surface Energy Balance in the Summer, Autumn and winter in the Northern Margin of Taklimagan Desert

Cao Huanqi1,2,3, He Qing2,3, *, Jin Lili2,3, Li Zhenjie4, Yang Xinghua2,3, Huo Wen2,3

(1. *College of Resource and Environmental Science*, *Xinjiang University*, *Urumqi* 830046, *China*;

2. *Institute Desert Meteorology*, *CMA*, *Urumqi* 830002, *China*;

3. *Taklimakan Desert Atmosphere and Environment Observing and Experimental Station of Xinjiang*, *Tazhong* 841000, *China*;

4. *Lincang Meteorological Office of Yunnan*, *Lincang* 677099, *China*)

Abstract: Energy balance in the terrestrial ecosystem plays an important role in regional climate and water balance. On the basis of the surface fluxes data from July to December 2014 at Xiaotang land - atmospheric interation observation station in the northern margin of the Taklimagan Desert, the characteristics of surface energy balance were studied by using ordinary least square (OLS) method and energy balance ratio (EBR) method. The results show that the diurnal variation of energy fluxes are in the form of inverted "U" type with single peak, except for latent heat flux, which are characterized by seasonal variation in the order of summer > autumn > winter. Energy balance is as follow: all day > day time > night and has a degressive trend from month to month. the energy balance at the soil heat flux of 5cm blow surface is significantly higher than that at surface soil heat flux. The energy balance ratio aggravating fluctuates during sunrise and sunset periods, negative at night, and apparently higher in the afternoon than in the morning. Under typical weater, the energy balance ratio shows sunny > cloudy > sand storm > rainfall.

Key words: eddy covariance; energy balance closure; energy balance ratio; ordinary least square; Taklimagan Desert